



TIETO- JA SÄHKÖTEKNIIKAN TIEDEKUNTA  
ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

# **KANDIDAATINTYÖ**

## **Alataajuuskaiuttimen suorituskykymittaus huoneympäristössä**

Tekijä

Antti Herronen

Ohjaaja

Timo Rahkonen

syyskuu 2020

**Herronen A. (2020) Alataajuuskaiuttimen suorituskykymittaus huoneympäristössä.** Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 23 s.

## **TIIVISTELMÄ**

Tässä työssä mitattiin alataajuuskaiuttimen ja kuunteluhuoneen muodostaman akustisen järjestelmän suorituskykyä. Suorituskykyyn liittyviä tekijöitä käsiteltiin ja mitattavaksi valittiin amplitudi- ja ryhmäviivevaste. Mittausmenetelmäksi valittiin porrastettu sinipyyhkäisy, joka osoittautui yksinkertaiseksi ja luotettavaksi. Taajuuskorjauksen tarjoamia mahdollisuuksia tarkasteltiin sekä yleisellä tasolla, että tutkittavan järjestelmän kannalta. Mittaustulosten perusteella järjestelmän toistoalueen todettiin ulottuvan hyvin matalille taajuuksille, mutta taajuusvasteessa oli merkittäviä jopa 20 dB:n vaihteluita. Kuunteluhuoneen merkityksen todettiin olevan keskeisessä asemassa, mikä on akustisille järjestelmille tyypillistä. Taajuuskorjauksen arvioitiin olevan mahdollista. Se toisi kuitenkin vain melko rajallisia parannuksia, sillä vaihtelu eri kuuntelupaikkojen taajuusvasteessa oli suurta. Amplitudivasteen osalta mittaustulosten luotettavuuden arvioitiin olevan hyvä. Muiden mittaustulosten luotettavuutta ei pystytty uskottavasti arvioimaan, sillä mittauksessa käytetyn mikrofonin ominaisuuksista ei ollut saatavilla riittävästi tietoa.

**Avainsanat:** akustiikka, taajuuskorjaus, minimivaihejärjestelmä, mikrofoni.

**Herronen A. (2020) Subwoofer Performance Measurement in a Room Environment.** University of Oulu, Faculty of Information Technology and Electrical Engineering, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering, Bachelor's Thesis, 23 p.

## **ABSTRACT**

**In this thesis, the performance of an acoustic system consisting of a low frequency speaker and a listening room was measured. Parameters affecting the performance were discussed, and amplitude and group delay responses were chosen to be measured. Stepped sine wave sweep was selected as the measurement method, and it was shown to be simple and reliable. The potential of equalization was examined both on a general level as well as in the case of the system under test. Based on the measurement results, the frequency range was found to extend to very low frequencies, but the frequency response had significant variations of as high as 20 dB. The role of the room was found highly significant, which is typical for acoustic systems. It was concluded that equalization is plausible. However, it could only bring minor improvements to the performance, as the variations in the frequency response were high between different listening locations. The reliability of the amplitude response measurements was estimated to be good. The reliability of the other measurements could not be assessed with confidence, as the specifications of the microphone used in the measurement were not detailed enough.**

**Key words: acoustics, equalization, minimum phase system, microphone.**

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHTENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

1	JOHDANTO .....	6
2	KODIN AKUSTIIKAN TEORIAA .....	7
	2.1 Äänentoistojärjestelmä ja sen suorituskyky .....	7
	2.2 Äänentoistojärjestelmän vasteen mittaus .....	9
	2.3 Taajuuskorjaus.....	10
3	MENETELMÄT .....	12
	3.1 Mittausmenetelmät .....	13
	3.2 Analyysimenetelmät.....	13
	3.3 Mittausvälineet .....	15
4	TULOKSET .....	17
5	POHDINTA .....	21
6	YHTEENVETO.....	22
7	LÄHDELUETTELO .....	23

## LYHTENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

MLS	maximum length sequence, maksimipituusjono
LTI	linear time-invariant, lineaarinen ja aikainvariantti
$A(\omega)$	amplitudi kulmataajuudella $\omega$
$e$	Neperin luku
$R^2$	selitysaste
$\omega$	kulmataajuus
$\varphi(\omega)$	vaihe kulmataajuudella $\omega$
$\tau_g(\omega)$	ryhmäviive kulmataajuudella $\omega$
$\mathcal{H}\{ \}$	Hilbert-muunnos
$\log( )$	luonnollinen logaritmi

## 1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan alataajuuskaiuttimen (engl. subwoofer) äänentoiston laadukkuutta tyypillisessä kodin kuunteluympäristössä. Aiheen valinta pohjautuu havaintoon, että huoneympäristö vaikuttaa merkittävästi kuuntelukokemukseen – jotkin taajuusalueet korostuvat toisten jäädessä taka-alalle. Myös suorituskyvyn parantamisen suotuisuutta on tarkoitus tarkastella ja siten syvemmin arvioida huoneen merkitystä.

Vaikka äänentoiston suorituskyvyn käsitteenä liittyy vahvoja mielipiteitä, voidaan sitä joissain määrin arvioida parametreilla kuten amplitudi- ja ryhmäviivevaste. Kyseiset parametrit antavat tietoa äänenvoimakkuudesta ja viiveestä eri taajuuskomponenttien välillä. Hyvän järjestelmän voidaan todeta näiden parametrien osalta käsittelevän kaikkia taajuuskomponentteja samoin. Tässä työssä on tarkoitus teknisen mittauksen avulla määrittää nämä kaksi parametria olemassa olevasta kodin äänentoistojärjestelmästä.

Äänentoistojärjestelmän amplitudi- ja ryhmäviivevastetta voidaan muuttaa taajuuskorjauksella, jonka tarjoamia mahdollisuuksia tutkittavan järjestelmän suorituskyvyn parantamiseksi tarkastellaan. Tässä yhteydessä käytetään ylimääräistä ryhmäviivettä apuna arvioitaessa taajuuskorjauksen suotuisuutta. Menetelmässä arvioinnin kohteena olevaa järjestelmää verrataan sellaiseen saman amplitudivasteen järjestelmään, jonka vaste voidaan täydellisesti korjata taajuuskorjaimella.

Teoriapainotteisessa luvussa 2 käydään ensin läpi kodin äänentoistojärjestelmän osat ja suorituskyvyn liittyviä tekijöitä. Siinä esitellään eräitä yleisesti käytettyjä mittaamenetelmiä teknisen mittaustyön pohjaksi. Lopuksi tarkastellaan äänentoistojärjestelmän suorituskyvyn parantamista taajuuskorjauksella. Luvussa 3 käsitellään suoritettavaa teknistä mittausta. Mittaus- ja analyysimenetelmät, sekä mittausvälineet esitellään. Mittaustulokset esitellään luvussa 4. Luvussa 5 arvioidaan työn saavutusten täyttymistä, sekä tarkastellaan tuloksia ja menetelmiä kriittisesti.

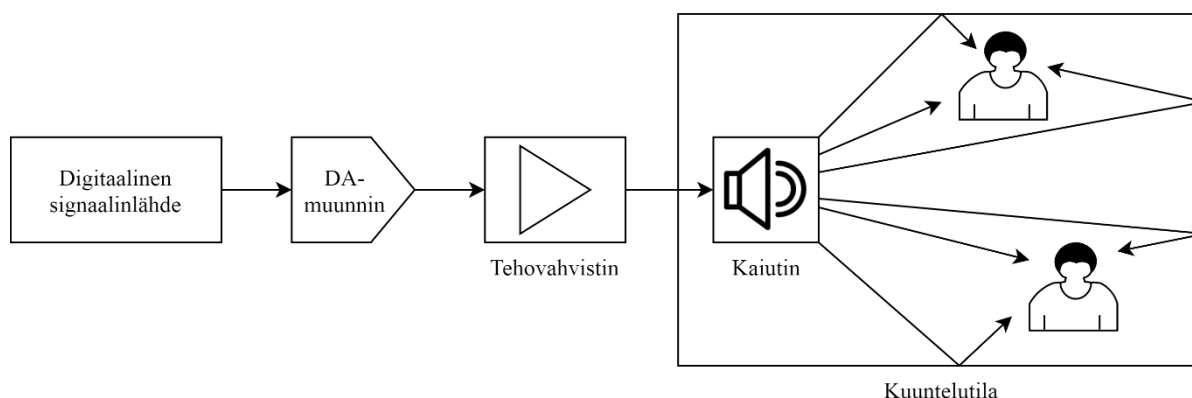
## 2 KODIN AKUSTIIKAN TEORIAA

Tämä luku käsittelee äänentoistojärjestelmien ja niitä koskevien mittausten perusperiaatteita työssä suoritettavan mittauksen kannalta. Ensin käydään läpi äänentoistojärjestelmän suorituskykyä koskevia tekijöitä, ja sen jälkeen tarkastellaan suosittuja menetelmiä taajuusvasteen mittaamiseksi. Lopuksi käsitellään taajuuskorjaukseen liittyviä periaatteita.

### 2.1 Äänentoistojärjestelmä ja sen suorituskyky

Äänentoistojärjestelmän suorituskyvyn mittaamiseksi on ensin määriteltävä itse järjestelmä ja siltä vaadittavat ominaisuudet. Järjestelmän tarkoitus on muuntaa sähköinen signaali ilmanpainevaihteluksi käyttäen sähköakustista muunninta eli kaiutinta. Järjestelmän sähköistä sisääntulosignaalia kutsutaan audiosignaaliksi ja ulostulosignaalia akustiseksi signaaliksi. [1 s. 9–12]

Nykyaikaisen äänentoistojärjestelmän keskeisiä osia havainnollistetaan kuvan 1 lohkokaaviossa. Äänen fysikaalisesta luonteesta johtuen tila, jossa kaiuttimet tuottavat ääntä, vaikuttaa merkittävästi vasteeseen, ja siksi se on oma lohkonsa lohkokaaviossa [1 s. 10–11]. Lohkokaaviossa tuodaan esille myös se tosiasia, että kuuntelutilan vaste on kuuntelupaikan funktio. Tilannetta voidaan verrata langattoman tiedonsiirron käsitteeseen monitie-eteneminen, jossa lähetetty radiosignaali kulkeutuu kanavassa useita reittejä vastaanottimeen, ja vastaanotettu signaali on lopulta useiden aikaviivästettyjen signaalien summa. Äänentoistojärjestelmän tapauksessa lähetin on kaiutin ja vastaanottajana on ihminen. Tämän työn kannalta merkityksellisin lohko onkin kaiuttimen ohella kuuntelutila. Muita lohkoja ei ole syytä kuitenkaan olettaa ideaalisiksi, vaan niiden vaikutusta mittauksiin tulee arvioida ja tarvittaessa minimoida.



Kuva 1. Äänentoistojärjestelmän lohkokaavio.

Koska äänentoistojärjestelmän tapauksessa vastaanottaja on ihminen, ei absoluuttista määritelmää suorituskyvylle ole. Ihmisen kuulomekanismin ja ääniaistimuksien teoriaa ei käsitellä tässä työssä, mutta eräitä niihin liittyviä seikkoja on syytä ottaa huomioon. Ihmisen kuuloalue on yksilöllinen, mutta rajoittuu karkeasti ottaen taajuuksille 20–20000 Hz, ja tässä työssä keskitytään noin 10–100 Hz:n taajuuksiin. Ääniaistimuksen voimakkuus ei kasva lineaarisesti äänenpaineen kasvaessa, vaan sitä kuvataan logaritmisella desibeliasteikolla suhteessa kuulokynnykseen, joka määritelmän mukaan vastaa hiljaisinta kuultavissa olevaa

äänenpainetta. Yleisesti ottaen kuulokynnys riippuu taajuudesta, ja koska tässä työssä tutkitaan kuuloalueen äärialueita, ei ole merkityksellistä hyödyntää kuulokynnystä. Äänenvoimakkuutta arvioidaankin tässä työssä logaritmisella asteikolla äänenpaineesta käyttäen amplitudivastetta. [1 s. 27–31]

Äänentoistojärjestelmien suorituskyykyyn liitetään mitattavia parametreja systeemien vertailemiseksi ja arvioimiseksi. Ehkä tunnetuimpia tällaisia parametreja ovat impulssivaste, jälkikaiunta-aika ja taajuusvaste. Impulssivastemittaus, jossa järjestelmään syötetään pulssi ja mitataan sen aiheuttama vaste, antaa tietoa esimerkiksi äänen kulkeutumisesta ympäristössä. Jälkikaiunta-aika kuvastaa akustisen energian niin sanottua kuolemisnopeutta, ja se on vahvasti yhteydessä impulssivasteeseen. Taajuusvaste on amplitudi-, vaihe- ja ryhmäviivevasteen sisältävä kokonaisuus, joka käsittelee eri taajuuskomponenttien kulkua systeemissä. Amplitudivaste ilmaisee äänenvoimakkuuden ja ryhmäviivevaste, joka on vaihevasteen negatiivinen derivaatta, antaa tietoa eri taajuuskomponenttien viiveestä systeemissä. Tässä työssä keskitytään taajuusvasteeseen ja tarkemmin ottaen amplitudi- ja ryhmäviivevasteeseen. [1 s. 10–11]

Kuten aiemmin todettiin, yleistä määritelmää äänentoistojärjestelmän suorituskyykyille ei ole. Siispä on syytä valita perusteet, joilla suorituskyykyä tässä työssä arvioidaan. Lähtökohtana määrittelylle käytetään ensinnäkin sitä, että järjestelmän ytimessä oleva kaiutin on sähköakustinen muunnin. On luontevaa määritellä, että hyvän suorituskyydyn muunnin käsittelee kaikkia signaaleja samalla tavoin taajuudesta riippumatta. Toinen tärkeä seikka on, että audiojärjestelmät ovat usein sellaisia äänensiirtoketjuja, joissa akustista signaalia siirretään mikrofoniin, sähköisen siirtotien ja kaiuttimen avulla [1 s. 9]. Tällaisessa tilanteessa on selvästi lähtökohtana ajatus, että signaali ei muutu järjestelmän vaikutuksesta. Näiden ajatusten pohjalta päädytään määritelmään, jossa suorituskyyky liittyy järjestelmän tuottamiin muutoksiin signaalissa. Hyvä suorituskyyky vastaa suoraa verrannollisuutta tulon ja lähdön välillä ja järjestelmän signaaliin tuomat muutokset tulkitaan suorituskyykyä huonontavana seikkana.

Esitelty äänenlaadun määritelmä on hyvin yksinkertainen, ja sen avulla on suoraviivaista asettaa tavoitteet myös mitattaville parametreille. Amplitudi- ja ryhmäviivevasteen tulisi olla sama kaikille taajuuksille. Määritelmä ei kuitenkaan ota kantaa esimerkiksi siihen, mikä mitattavissa olevista parametreista on merkityksellisin. Lisäksi äänenpaineen vähimmäisvaatimus on käytännön äänentoistotilanteissa aina läsnä, jotta kuulokynnys ylittyy ja ääni on ylipäättään kuultavissa [1 s. 27–28]. Pelkkä suora verrannollisuus ulostulo- ja sisääntulosignaalien välillä ei siis käytännössä riitä, mutta absoluuttista äänenpainetta ei kuitenkaan tässä työssä ole tarkoitus tutkia.

Aiemmin esitetystä suorituskyydyn määritelmästä voidaan päätellä, että ideaalisesti kyseessä on LTI- eli lineaarinen ja aikainvariantti järjestelmä (engl. linear time-invariant system). Audiojärjestelmien mallinnuksessa onkin yleistä soveltaa LTI-järjestelmien teoriaa [2, 3, 4], mutta tällaisen approksimaation tarkkuutta tulee pohtia tapauskohtaisesti [2 s. 8–9]. Usein kaiutin on järjestelmän epälineaarisiin osa, mutta jopa huoneen mekaaniset osatkin saattavat tuottaa epälinearisuutta järjestelmään. Täydellinen aikainvarianttisuus on käytännössä mahdotonta saavuttaa tyypillisessä huoneympäristössä, sillä huoneessa siirrellään tavaroita, avataan ja suljetaan ovia ja liikutaan. On myös muistettava lämpötilan ja ilman kosteuden vaikutus äänen nopeuteen ja sitä kautta huoneen siirtofunktioon ajan funktiona [1 s. 183–188]. [2 s. 31–34]

Tässä työssä tutkimuksen keskiössä oleva kaiutin on alataajuuskaiutin. Sen tarkoitus on toistaa kuultavien äänien matalimmat taajuudet eli noin 20–100 Hz. Toisin kuin ylä- ja



keskiäänikaiuttimet, näin matalilla taajuuksilla toimiva kaiutin on väistämättä ympärisäteilevä. Kaiutinta ei siis voida erityisemmin suunnata kuuntelijoita kohti, vaan merkittävä osa äänienergiasta kulkeutuu korviin heijastusten kautta ja huoneen merkitys on huomattava. [1 s. 179–180]

## 2.2 Äänentoistojärjestelmän vasteen mittaus

Äänentoistojärjestelmän siirtofunktion mittaamiseksi on olemassa useita eri menetelmiä. Yleisimmät mittaamenetelmät perustuvat siihen, että järjestelmään syötetään tunnettu signaali eli heräte, järjestelmän ulostulosignaali eli vaste mitataan ja lopuksi vastetta verrataan alkuperäiseen signaaliin. Tällainen menettely on yleinen LTI-järjestelmien karakterisoinnissa. Mittaukseen vaikuttaa aina tiettyjä häiriöitä, kuten kohina, sekä ylipäättään kaikki LTI-approksimaatiosta koituvat epätarkkuudet. Myös järjestelmään syötettävän signaalin laatu sekä mittalaitteisto voivat vaikuttaa mittaukseen. Mittausmenetelmien keskinäiset erot syntyvät pääasiassa käytettävästä herätteestä ja siitä, kuinka häiriöt vaikuttavat mittaukseen. Suosituttuja herätesignaaleja ovat Diracin deltafunktioa jäljittelevä impulssi, maksimipituusjono (engl. maximum length sequence, MLS), sekä erilaiset sinipyyhkäisyt. [3]

Impulssin käyttäminen herätesignaalina on ehkä ilmiselvin vaihtoehto impulssivasteen ja sitä kautta siirtofunktion määrittämiseksi. Vaste on sellaisenaan impulssivaste ja siirtofunktio voidaan laskea siitä Fourier-muunnoksella. Menetelmän haasteina ovat kuitenkin heräteimpulssin luominen käytännössä, sekä huono signaali-kohina-suhde yksittäisessä mittauksessa. Impulssi voi myös saattaa kaiutinelementin hyvin epälineaariseksi toimintalueelle, eikä harmonisia signaaleja voida eristää mittauksesta. [3]

Maksimipituusjono on sellainen binäärisekvenssi, joka sisältää kaikki  $N$ -bittiset binäärisanat nollaa esittävää sanaa lukuun ottamatta, käyttäen pienimmän mahdollisen määrän bittejä eli  $2^N - 1$ . Tällaiset herätteet kärsivät samoista epälineaarisuuden tuomista ongelmista kuin impulssi. Mittausten analysoinnissa vaaditaan myös verrattain monimutkaista signaalinkäsittelyä siirtofunktion määrittämiseksi. [3, 5]

Sinipyyhkäisyllä tarkoitetaan sinimuotoista signaalia, jonka taajuus muuttuu ajan funktiona. Tällaisilla herätteillä saavutetaan hyvä signaali-kohina-suhde ja epälineaarisuudesta aiheutuvat haitat ovat pienet. Sinipyyhkäisyherätteet voidaan jakaa jatkuvaan ja porrastettuun pyyhkäisyyn, joissa taajuuden muutos on siis joko jatkuva tai taajuus kerrallaan muuttuva askelmainen. Jatkuva pyyhkäisy voidaan suorittaa hyvin nopeasti, kun taas porrasmaisen herätteen mittauksessa on sallittava huomattavasti aikaa taajuusvaihdoksista aiheutuvien transienttien asettumiselle. Porrasmaisen herätteen tapauksessa tutkitaan siis ns. steady-state vastetta. [3]

Mittausmenetelmän ohella mittauslaitteisto on tärkeässä asemassa. Sen vaikutuksia mittaustuloksiin tulee arvioida ja tarvittaessa minimoida. Mittauksen kohteena olevat järjestelmän osat tulisi pyrkiä eristämään mittalaitteistosta, mikä voidaan toteuttaa suorittamalla erillinen referenssimittaus mittalaitteiston aiheuttamien vääristymien kompensointia varten. Varsinaisessa mittauksessa kaiuttimelle syötetty signaali voidaan referenssimittauksessa syöttää suoraan mittalaitteistolle, jolloin mittauksen kohde on mittalaitteisto. Ainut komponentti, jolle ei voida tällaista kompensointia tehdä on mikrofoni. Näin ollen erityisesti mikrofoniin laadukkuus on tärkeää.

Mittauksessa on syytä käyttää suuntaamatonta mikrofonia, jotta huoneen heijastukset saadaan taltioitua neutraalisti. Erityisen tärkeää se on matalilla taajuuksilla, sillä näin

minimoidaan lähiäänivaikutuksen (engl. proximity effect) mahdollisesti aiheuttamat vääristykset. Lähiäänivaikutuksella tarkoitetaan sitä ilmiötä, jossa mikrofoniin taajuusvaste on hyvin vahvasti riippuvainen etäisyydestä äänilähteeseen, ja tämä on tyypillistä suuntaaville mikrofoneille. [1 s. 35]

## 2.3 Taajuuskorjaus

Osa tätä työtä on tutkia, kuinka tarkasteltavaa järjestelmää voitaisiin parantaa esivääristyksen keinoin. Audiojärjestelmissä taajuusvasteen muokkaamisesta esivääristämällä käytetään yleisesti termiä taajuuskorjaus. Erityisesti huoneesta aiheutuvien ilmiöiden korjauksessa puhutaan myös huonekorjauksesta. Käytännössä taajuuskorjain on suodatin, jonka läpi audiosignaali syötetään kaiuttimelle. Kuvassa 2 [6] esitetty perinteinen graafinen taajuuskorjain on analoginen laite, jolla voidaan hahmotella liukusäätimin halutun muotoinen amplitudivaste suodattimelle. Myös digitaalisia laitteita on kehitetty ja esimerkiksi puhelimen musiikkisovelluksessa voi olla digitaalinen taajuuskorjaintoiminto, joka usein jäljittelee käyttöliittymältään analogista esi-isäänsä. [7]



Kuva 2. Graafinen taajuuskorjain. Suodattimen amplitudivaste voidaan hahmotella liukusäätimillä, joista kukin vastaa tiettyä taajuuskaistaa logaritmisella taajuusasteikolla.

Periaatteessa mikä tahansa nollasta poikkeava ja stabiili amplitudivaste voidaan saattaa suoraksi vahvistamalla ja vaimentamalla taajuusalueita sopivasti, sillä akustinen äänenpaine on verrannollinen sähköiseen signaalitasoon. Tällainen amplitudivasteen korjausmenettely johtaa vaihe- ja ryhmäviivevasteen muuttumiseen, mikä saattaa heikentää kuuntelukokemusta. Jotta saataisiin sekä suora amplitudi- että ryhmäviivevaste, voidaan taajuuskorjaimena käyttää äänentoistojärjestelmän siirtofunktion käänteisfunktia. On kuitenkin olemassa rajoituksia

sille, minkälaiselle järjestelmälle voidaan käytännössä toteuttaa käänteinen siirtofunktio. Ominaisuuksia, joille ei voida toteuttaa kumoavaa siirtofunktiota, ovat epästabiili käyttäytyminen, nolla-amplitudi ja viive. Tämän vuoksi kaikkia kaiuttimen ja huoneen aiheuttamia vääristymiä ei välttämättä voida taajuuskorjaimella korjata. Viiveen tapauksessa tosin usein riittää, että kaikki taajuuskomponentit ovat yhtä paljon viivästettyjä, eikä kumoaminen ole siten ainut taajuuskorjauksen keino. [8]

Eräs keino tutkia taajuuskorjauksen potentiaalia järjestelmässä on selvittää, onko järjestelmä minimivaihejärjestelmän kaltainen. Minimivaihejärjestelmä on sellainen LTI-järjestelmä, joka on kausaalinen ja stabiili, ja jonka käänteisjärjestelmä on myös kausaalinen ja stabiili [9]. Minimivaihejärjestelmän vaste voidaan siis teoriassa suoristaa täydellisesti käyttäen sen käänteisjärjestelmää taajuuskorjaimena. Äänentoistojärjestelmä ei kuitenkaan voi koskaan olla aito minimivaihejärjestelmä, koska siinä esiintyy viiveitä, kuten äänennopeudesta aiheutuva viive. Taajuusriippumaton viive ei kuitenkaan vaikuta äänenlaatuun, sillä signaalimuoto säilyy muuttumattomana. Tarkoitus onkin tutkia, millä tavoin järjestelmä eroaa minimivaihejärjestelmästä eri taajuuksilla. [10]

Äänentoistojärjestelmän minimivaiheisuutta voidaan tutkia määrittämällä sille ylimääräinen ryhmäviive. Se saadaan, kun otetaan järjestelmän ryhmäviive, ja vähennetään siitä järjestelmän amplitudivastetta vastaavan minimivaihejärjestelmän ryhmäviive. Sillä siis kuvataan järjestelmän eroavaisuutta minimivaihejärjestelmästä ryhmäviiveen osalta. Jos esimerkiksi ylimääräinen ryhmäviive on taajuudesta riippumaton positiivinen vakio, voidaan järjestelmän ajatella koostuvan minimivaihejärjestelmästä ja taajuudesta riippumattomasta viiveestä ikään kuin kahtena erillisenä lohkonaan. Tällainen järjestelmä poikkeaa minimivaihejärjestelmästä siis vain viiveen osalta. [10]

Edellisen perusteella taajuuskorjaukselle suotuisat taajuusalueet voidaan saada selville määrittämällä ylimääräinen ryhmäviive. Suotuisia ovat ne alueet, joilla ylimääräinen ryhmäviive on vakio taajuuden funktiona. [10]

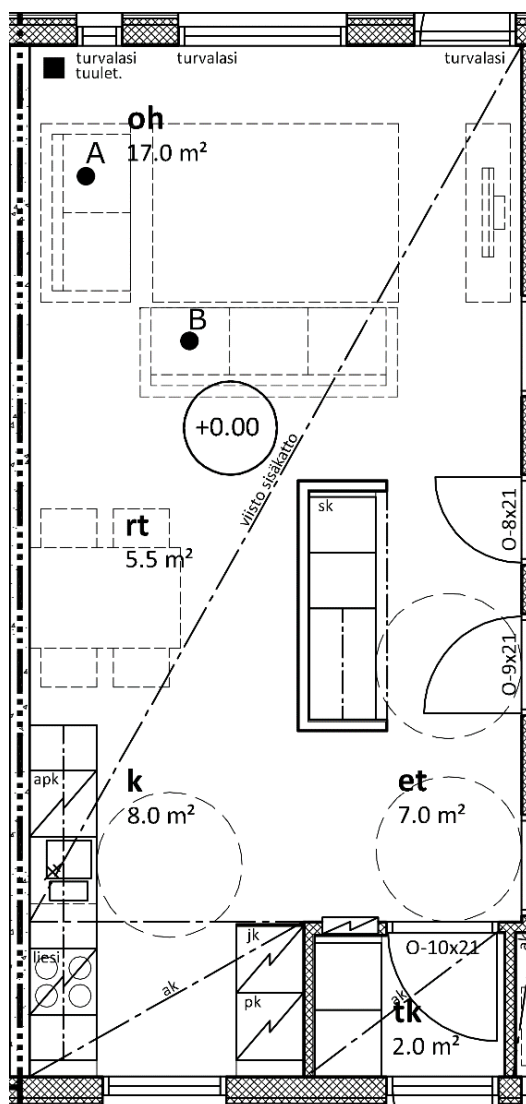
Järjestelmän ylimääräisen ryhmäviiveen määrittämiseksi täytyy ensin tuntea järjestelmän amplitudivastetta vastaavan minimivaihejärjestelmän ryhmäviive. Tämä on mahdollista, sillä amplitudivaste sellaisenaan määrittelee yksiselitteisesti minimivaihejärjestelmän. Mitatulle amplitudivasteelle voidaankin laskea sitä vastaavan minimivaihejärjestelmän vaihevaste käyttäen kaavaa

$$\varphi(\omega) = \mathcal{H}\{\log(A(\omega))\}, \quad (1)$$

missä  $A(\omega)$  on amplitudivaste ja  $\mathcal{H}\{\}$  kuvaa Hilbert-muunnosta. Ryhmäviive on tunnetusti vaihevasteen negatiivinen derivaatta taajuuden funktiona. [11, 12, 13 s. 788–789]

### 3 MENETELMÄT

Tässä työssä tutkittava järjestelmä on kodin äänentoistolaitteiston osa, joka koostuu kaiuttimesta ja huoneesta. Mittauksen ainut äänilähde on kaupallinen refleksikoteloitu alataajuuskaiutin. Se on aktiivikaiutin, eli siinä on sisäänrakennettu tehovahvistin. Kaiutin sijaitsee olohuoneen nurkassa kuvassa 3 esitetyn pohjapiirroksen osoittamassa paikassa. Kuvaan on myös merkitty mittaukseen valitut kaksi yleisintä kuuntelupaikkaa, joihin viitataan kirjaimilla A ja B. Pohjapiirros on huonekalujen osalta suuntaa antava, mutta huoneen mittasuhteet on tarkastusmitattu oikeiksi. Huone on akustiikan näkökulmasta verrattain kompleksinen, sillä olohuone, keittiö ja eteinen ovat yhtä avointa tilaa, jonka keskellä on lattiasta kattoon ulottuva kaapisto. Katto on viisto huonekorkeuden ollessa enimmillään 3,7 m ja alimmillaan 2,3 m. Lisäksi ovia on useita, joten muutokset huoneen siirtofunktiossa ovat vääjäämättömiä. Mittausten aikana huone pyrittiin kuitenkin säilyttämään muuttumattomana eikä muutoksien vaikutuksia tutkittu.

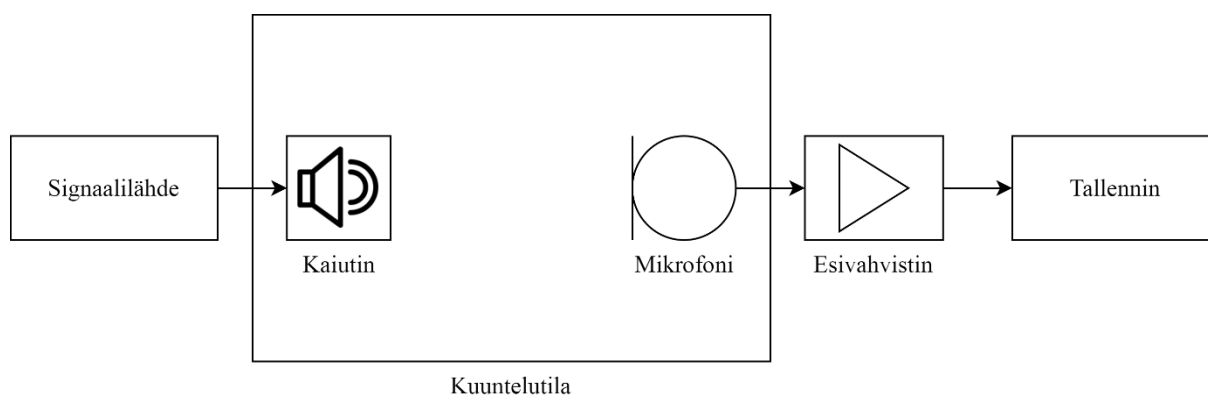


Kuva 3. Kuuntelualueen pohjapiirros. Kaiuttimen sijainti on merkitty neliöllä ja mittauspaikat A ja B palloilla.

### 3.1 Mittausmenetelmät

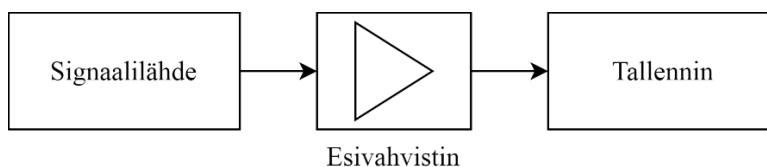
Mittausmenetelmän valinnassa painotettiin yksinkertaisuutta, sillä luotettavimman mittausmenetelmän löytäminen ei ollut tavoitteena. Impulssimaisia epäjatkuvuuksia sisältävät herätteet suljettiin pois, sillä työssä käytettävästä laitteistosta ei ollut saatavilla tarpeeksi tietoja, jotta epälineaarisuudesta mahdollisesti aiheutuvien vääristysten suuruutta voisi arvioida luotettavasti. Käyttöön valittiin porrasmainen sinipyyhkäisy. Epäjatkuvuuksista johtuen mittaus tulisi olemaan aikaa vievämpi kuin jatkuvalla sinipyyhkäisyllä, mutta se ei kuitenkaan tulisi hidastamaan työn suoritusta oleellisesti.

Mittausjärjestelyitä kuvaava lohkokaavio on esitetty kuvassa 4. Signaalilähde syöttää sähköisen herätteen kaiuttimelle ja kuuntelupaikkaan sijoitettu mikrofoni muuntaa kaiuttimen tuottaman akustisen signaalin takaisin sähköiseksi. Mikrofonin kytetään esivahvistin, jonka lähtö tallennetaan mittauksen analysointia varten.



Kuva 4. Lohkokaavio mittausjärjestelyistä.

Varsinaisten vastemittausten lisäksi suoritetaan referenssimittaus, jotta mittalaitteiston taajuusvaste voidaan kompensoida mittauksen analysointivaiheessa. Referenssimittauksessa signaalilähde kytketään suoraan esivahvistimen tuloon, jolloin mikrofoni jää ainoana mittalaitteena ilman kompensointia. Tämän mittauksen lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Lohkokaavio referenssimittauksesta.

### 3.2 Analyysimenetelmät

Mittausdatan analysointi suoritettiin Matlab-ohjelmistolla. Analysoinnin perustana oli sinimuotoisen funktion sovittaminen mittausdataan kullakin herätetaajuudella pienimmän neliösumman menetelmää käyttäen. Herätesignaali luotiin niin ikään Matlab-ohjelmistolla, ja se koostui peräkkäisistä siniaaltoäyhteistä vakioamplitudilla. Porrastuksen suuruudeksi eli

mittausresoluutioksi valittiin 0,25 Hz ja yhden näytteen pituudeksi kaksi sekuntia, jotta taajuusvaihdoksesta aiheutuvat transientit ehtisivät asettua. Sovitusmenetelmällä voitiin määrittää amplitudivaste, mutta vaihevasteen osalta absoluuttisen tason määrittäminen olisi vaatinut vaihereferenssin määrittämisen. Tämä ei olisi työn kannalta merkityksellistä, sillä tavoitteena ei ollut määrittää vaihevastetta, vaan tutkia sen avulla määritettävän ryhmäviivevasteen vaihtelevuutta. Tätä vaihtelua voitaisiin analysoida sovituksen tuloksista ilman vaihereferenssiä. Menetelmä perustuu siihen, että todellisen vaihevasteen sijaan voitiin sovitetun funktion perusteella määritellä parametri

$$\varphi'(\omega) = \varphi(\omega) + a\omega + b, \quad (2)$$

missä  $\varphi(\omega)$  on todellinen vaihevaste ja tuntemattomien vakioiden  $a$  ja  $b$  määrittäminen vaatisi vaihereferenssin. Määrittämällä parametriä  $\varphi'(\omega)$  vastaava ryhmäviive, saadaan

$$\tau'_g(\omega) = \tau_g(\omega) - a, \quad (3)$$

missä  $\tau_g(\omega)$  on todellinen ryhmäviivevaste. Vaihtelut funktiossa  $\tau'_g(\omega)$  ovat siis vastaavia kuin vaihtelut todellisessa ryhmäviiveessä, eikä itse vaihteluiden tutkimiseksi vaadita ryhmäviiveen määrittämistä. Tässä työssä käytetään termiä ryhmäviive, vaikka todellisuudessa olisi kyse funktiosta  $\tau'_g(\omega)$ .

Kohinasta ja muista häiriöistä johtuen mittausdatan ja siihen sovitettavan sinimuotoisen funktion erotuksen odotettiin olevan nollasta poikkeava. Siispä sovituksen onnistumisen ja mittauksen tarkkuuden arvioimiseksi jokaiselle sovitetulle funktiolle määritettiin selitysaste. Tämän laskemiseksi käytettiin kaavaa

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (4)$$

missä  $\hat{y}$  kuvaa mittausdataa,  $y$  sovitettua funktiota,  $\bar{y}$  sovitetun funktion aritmeettista keskiarvoa ja  $n$  näytteiden lukumäärää. [14]

Ylimääräisen ryhmäviiveen määrittäminen perustuu systeemistä kerätyn amplitudi-informaation hyödyntämiseen. Sovitetun funktion selitysasteen ollessa matala, ei mittaus kuitenkaan tuota informaatiota itse tutkittavasta järjestelmästä, vaan häiriöistä kuten kohinasta. Niinpä ylimääräisen ryhmäviiveen määrittämiseen päätettiin hyödyntää vain sitä osaa amplitudivasteesta, jolla selitysaste oli yli 0,5. Kuitenkin laskutoimitukseen käytetty *hilbert*-funktio oletti sisääntulosignaalin olevan yhden periodin mittainen eli tässä tapauksessa nollan suhteen symmetrinen taajuustason kuvaus amplitudista. Tämän vuoksi oli tarpeen approksimoida systeemin amplitudivaste niiltä osin, kun mittaus ei tuottanut informaatiota. Koska lopulta vain alataajuuksilla noin 0–15 Hz:n alueella jouduttiin tyytyä approksimaatioon, voitiin käyttää yksinkertaista mallia. Kaksi alinta mittaukseen valittua pistettä ekstrapoloitiin käyttäen  $e$ -kantaista eksponenttifunktiota. Tähän käytettiin kaavaa

$$A(\omega) = ae^{b\omega}, \quad (5)$$

missä  $\omega$  on kulmataajuus, ja vakiot  $a$  ja  $b$  valitaan siten, että funktio  $A(\omega)$  toteuttaa ekstrapoloitaviksi valitut kaksi amplitudipistettä. Approksimaatiota käyttäen saatiin lopulta amplitudivaste nollataajuudelta halutulle ylärajataajuudelle. Tämä amplitudivaste peilattiin

vielä negatiivisille taajuuksille nollan suhteen, jonka jälkeen hyödynnettiin kaavaa 1 ylimääräisen ryhmäviiveen laskemiseksi.

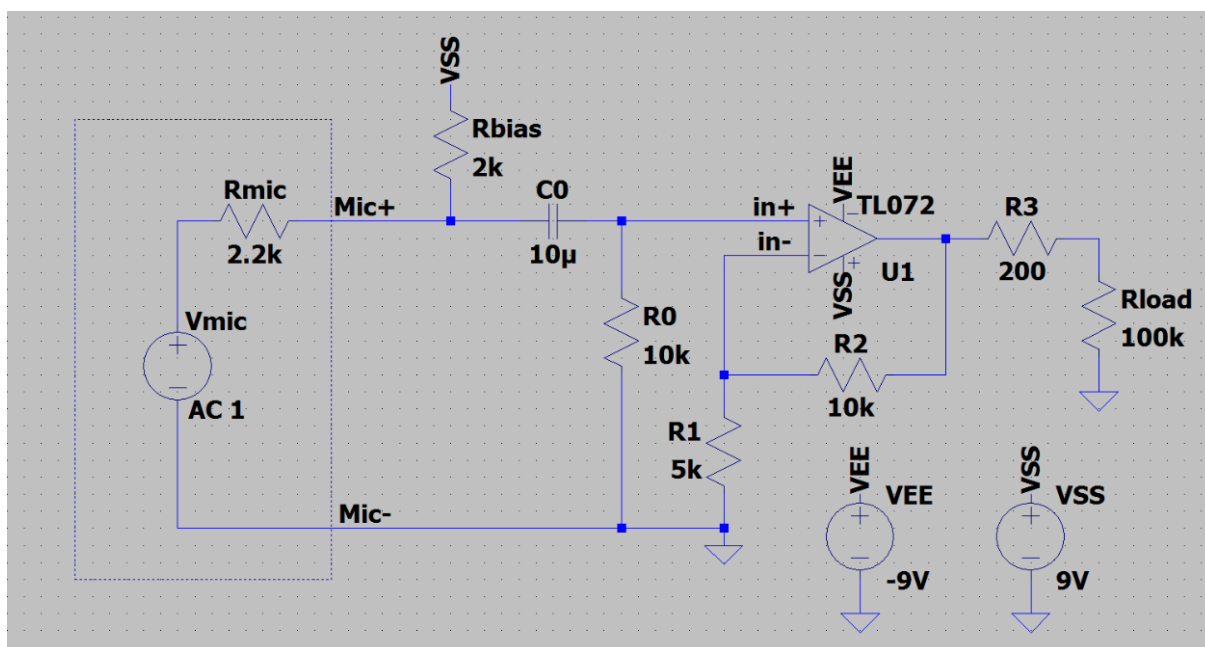
Analyysikoodi kompensoi mittalaitteiston aiheuttamia vääristymiä käyttäen hyväksi referenssimittauksen tuloksia. Varsinaiset mittaustulokset suhteutetaan referenssimittauksen tuloksiin, jolloin mittalaitteiston vaikutus tuloksissa kumoutuu.

### 3.3 Mittausvälineet

Mittausjärjestelmän ehkä oleellisimpana osana käyttöön valittiin PUI Audio POM-2738L-LW100-R elektreettimikrofoni. Valmistaja ilmoittaa mikrofonin  $\pm 3$  dB:n taajuusalueeksi 15–16000 Hz. Mikrofonin vaihevasteesta ei ole saatavilla tietoja, eikä sen määrittäminen ole osa tätä työtä. Vaihevaste oletetaan lineaariseksi, mikä merkitsee taajuuden suhteen muuttumatonta ryhmäviivettä ja siten vääristymätöntä aaltomuotoa. [15, 16]

Käytettävä elektreettimikrofoni on kaksinapainen komponentti, jossa on sisäänrakennettu transistorivahvistin. Toinen napa on signaalimaa ja toinen on signaaliulostulo, johon myös syötetään bias-jännite transistorin saattamiseksi toiminta-alueelle. Biasoinnista aiheutuva DC-taso suodatetaan pois AC-kytkemällä signaali esivahvistinpiirille. Mikrofonin lähtöimpedanssiksi on ilmoitettu 2,2 k $\Omega$ . [15, 16]

Esivahvistinpiiri koostuu suorasta operaatiovahvistinkytkenästä, jonka perustana on käytetty Siegfried Linkwitzin esittämää kytkentää audiomittauksia varten [17]. Piirikaavio on esitetty kuvassa 6. Mikrofonin DC-biasoinnin suodattava kondensaattori on valittu siten, että piirin alarajataajuus on matala; alle 2 Hz. Vahvistus on noin 3 V/V.



Kuva 6. Esivahvistinpiirin piirikaavio. Vmic ja Rmic mallintavat elektreettimikrofonia, joka on biasoitu Rbias-vastuksen kautta toiminta-alueelle.

Signaalinlähteenä mittauksessa käytettiin tietokonetta kytkemällä kaiutin suoraan kuulokeliitintään ilman lisävahvistusta, sillä kyseessä on aktiivikaiutin. Herätesignaalin toistamiseen käytettiin Audacity-ohjelmistoa, joka on avoimen lähdekoodin ohjelmisto äänen

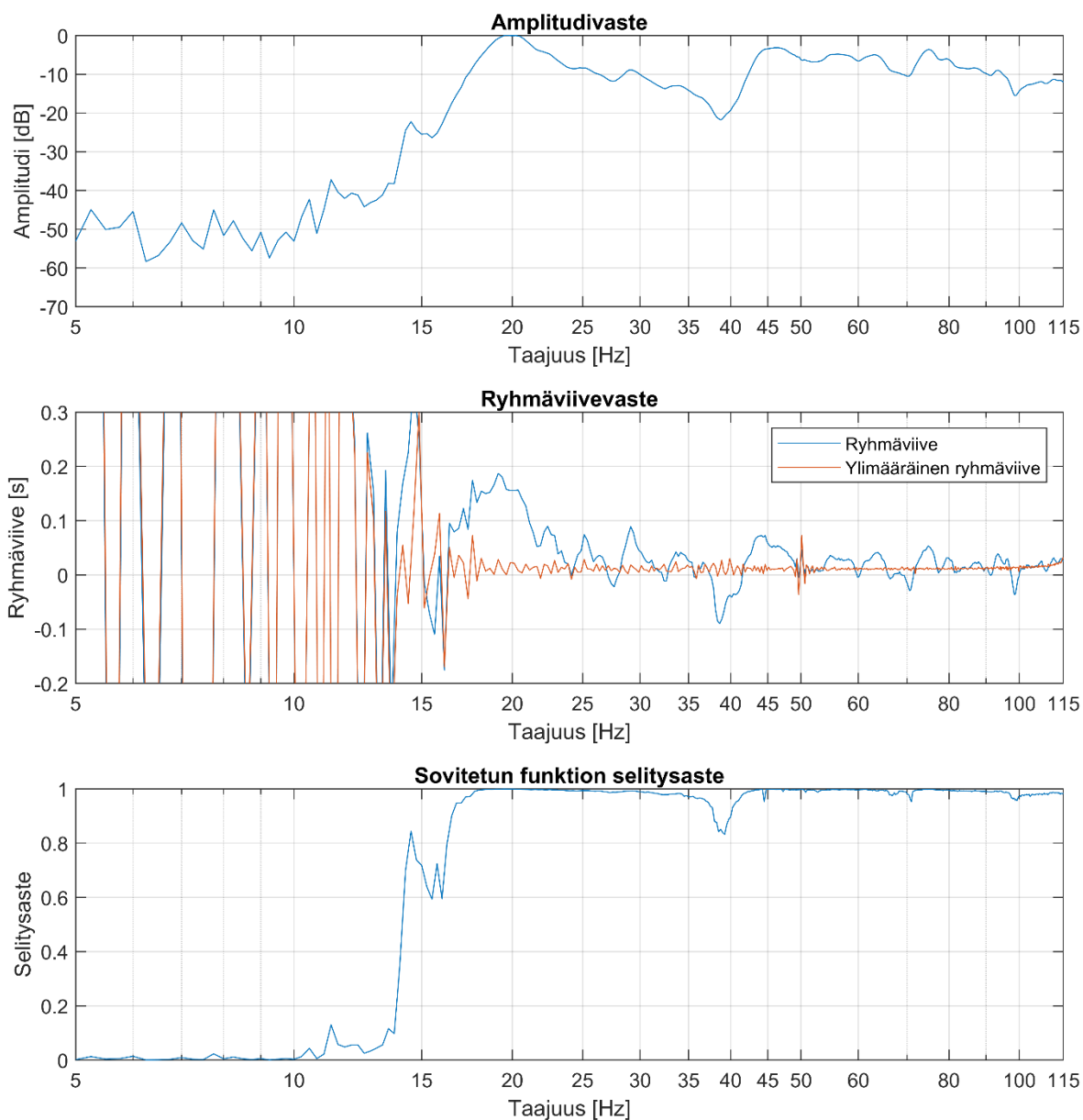
muokkaamiseen, toistamiseen ja tallentamiseen [18]. Samalla ohjelmistolla suoritettiin myös äänen tallennus.

Signaali päätettiin syöttää kaiuttimelle samalla äänenvoimakkuustasolla molemmissa mittauksissa. Tämän oletettiin vaikuttavan signaali-kohina-suhteeseen kahden mittauksen välillä, mutta tärkeämmäksi katsottiin kuitenkin se, että koko mittausjärjestelmä on identtinen molemmissa mittauksissa.

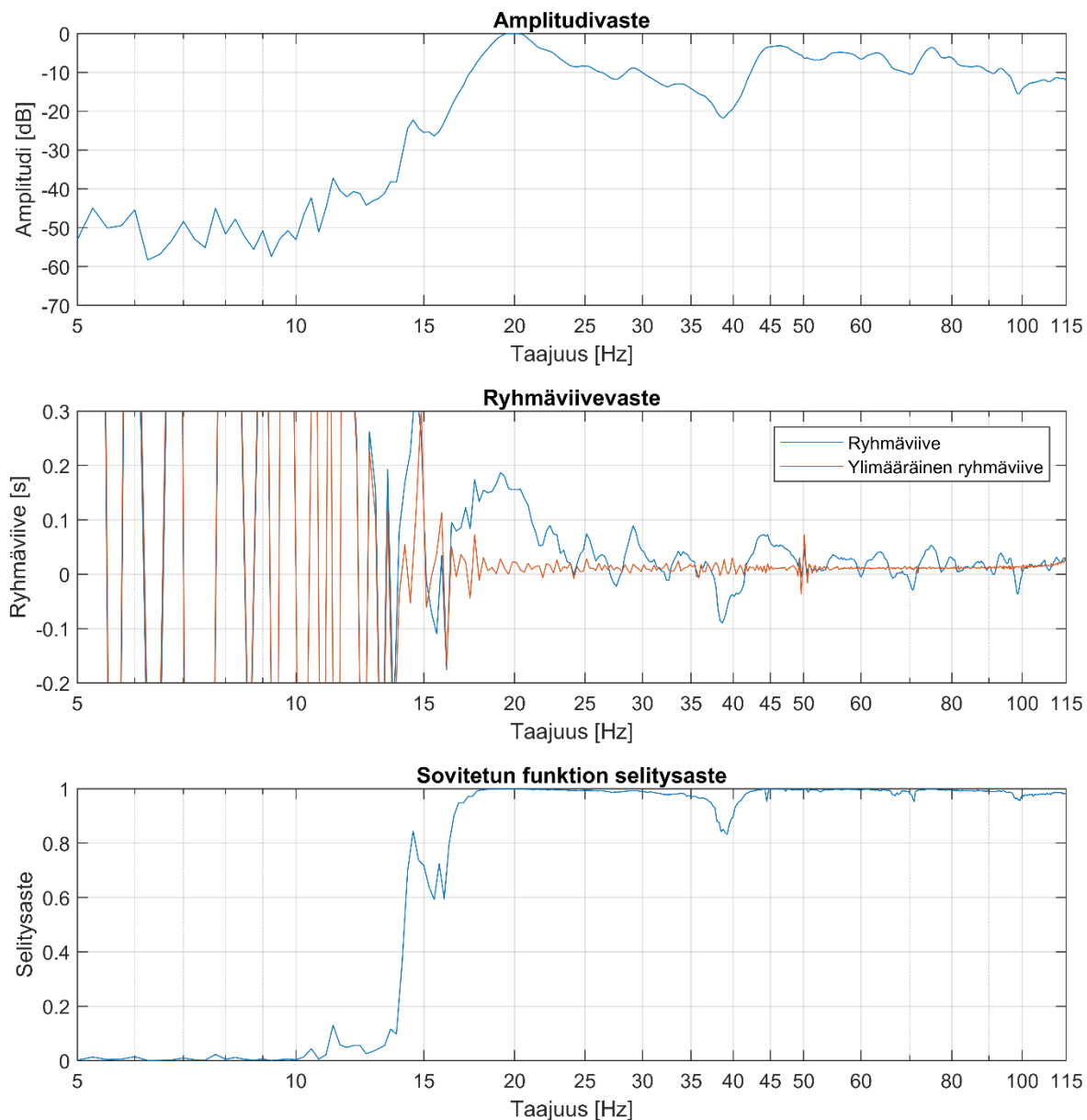


## 4 TULOKSET

Tämän työn keskeisin mittausparametri on äänenvoimakkuutta kuvastava amplitudi, jonka ohella ylimääräinen ryhmäviive antaa käsitystä taajuuskorjauksen mahdollisuuksista. Lisäksi järjestelmän ryhmäviive sellaisenaan antaa tietoa taajuuskomponenttien välisestä viiveestä. Mittaustulosten luotettavuutta arvioidaan selitysasteella. Nämä parametrit on esitetty kuvassa 7 kuuntelupaikan A mittauksille, ja vastaavasti kuvassa 8 kuuntelupaikan B mittauksille. Kuvissa amplitudi on esitetty siten, että mittauksen huippuarvo on 0 dB, sillä absoluuttista amplitudia ei mitattu. Samaan tapaan ryhmäviiveen osalta tuloksiin on lisätty summittainen vakio-termi kuvaajien siirtämiseksi noin 0 sekunnin tuntumaan havainnollisuuden vuoksi, sillä vain vaihtelut ovat oleellisia eikä absoluuttista tasoa edes määritetty.



Kuva 7. Kuuntelupaikan A mittaustulokset.



Kuva 8. Kuuntelupaikan B mittaustulokset.

Mittaustuloksista nähdään, että kaiutin ei pysty juuri toistamaan ääntä matalimmilla mitatuilla taajuuksilla noin 15 Hz:n alapuolella. Tämä ilmenee sekä amplitudin että selitysasteen matalina arvoina, sillä mitattu signaali on tällöin lähinnä kohinaa ja yhden taajuuskomponentin osuus on pieni. Kohinan vaihe on satunnainen, ja tämä näkyy hyvin voimakkaana vaihteluna ryhmäviiveessä ja sitä kautta myös ylimääräisessä ryhmäviiveessä. Näiden kahden parametrin osalta matalimpien taajuuksien tarkastelu ei siis kerro mitään itse tutkittavasta järjestelmästä.

Mittaukset viittaavat siihen, että kaiutin olisi viritetty 20 Hz:n taajuudelle, sillä sitä alemmille taajuuksille liikuttaessa amplitudivaste laskee melko tasaisesti kohti kohinatasoa molemmissa mittauksissa. Lisäksi 20 Hz:n kohdalla on amplitudihuippu.

Koko järjestelmän alarajataajuus on hieman vaikea nähdä mittaustuloksista, sillä suurta vaihtelua on nähtävissä koko taajuusalueella. Noin 18 Hz:n taajuudella amplitudi on molemmissa mittauksissa samalla tasolla kuin vaikkapa 30 Hz:n alueella, joten se epäilemättä kuuluu vielä toistoalueeseen.

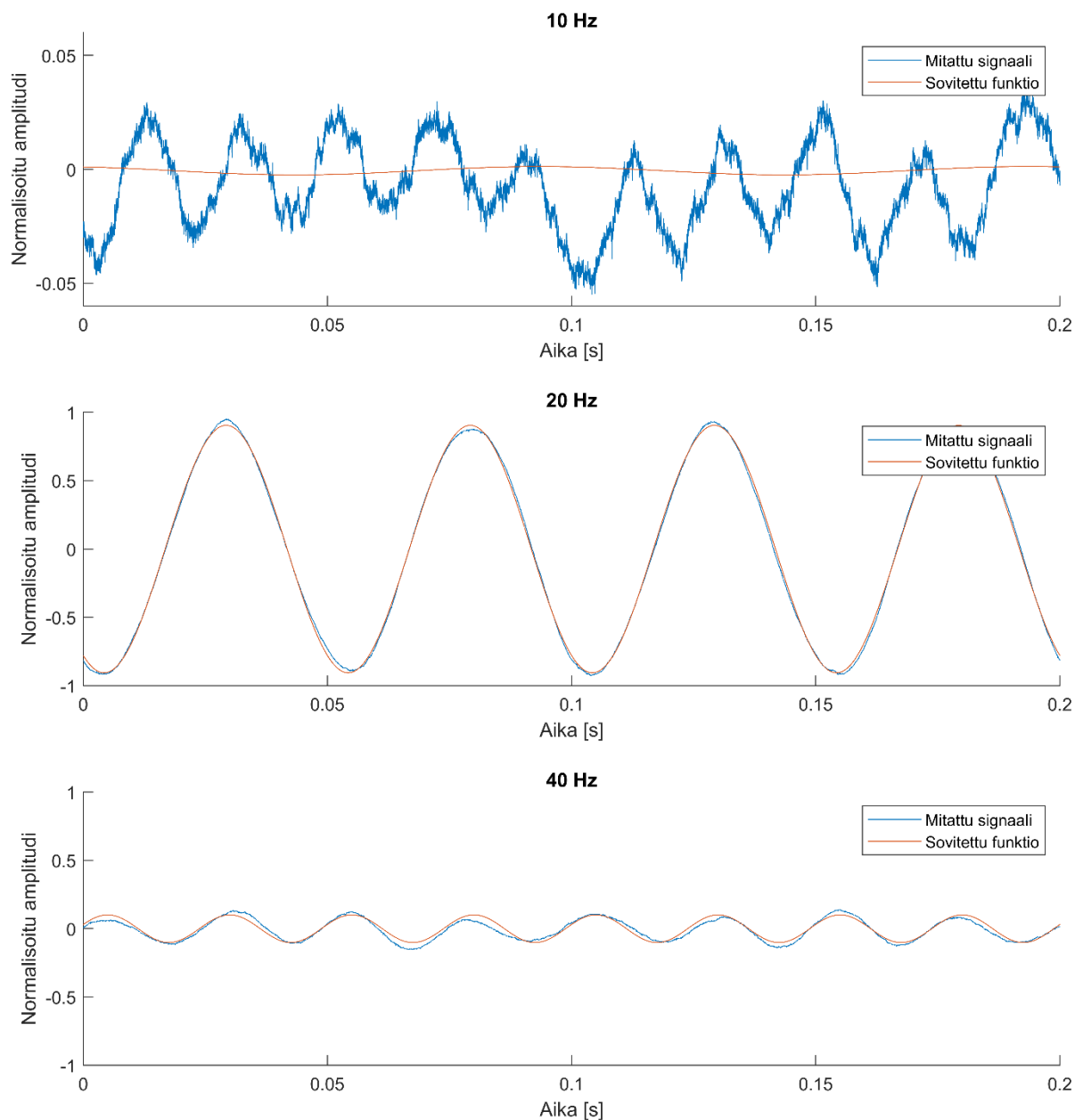
Molemmissa mittauksissa on noin 45 Hz:n taajuudella paikallinen amplitudihuippu. Kuuntelupaikan B osalta se ei kuitenkaan erotu yhtä selvästi kuin A:n kohdalla ja lisäksi noin 40 Hz:n tuntumassa on selkeä vaimentuma, jota kuuntelupaikan A mittauksessa ei ole nähtävissä. Amplitudin vaihteluväli on mittaustaikan B osalta hieman yli  $\pm 10$  dB, kun taas A:n osalta se on hieman pienempää.

Ylimääräinen ryhmäviive ei osoita suuria poikkeamia kaiuttimen toistoalueella noin 16 Hz:n yläpuolella. Suurin poikkeama on 50 Hz:n ympäristössä kuuntelupaikan B mittauksessa. Sähköverkko on potentiaalinen häiriölähde mittaukselle kyseisellä taajuudella, mutta koska samankaltaista poikkeamaa ei kuuntelupaikan A osalta ole nähtävissä, voidaan mittaushäiriön mahdollisuutta pitää pienenä.

Koska vaihtelu ylimääräisessä ryhmäviiveessä on maltillista verrattuna ryhmäviiveen vaihteluun, näyttää siltä, että koko taajuusalueella voitaisiin tehdä taajuuskorjausta suorituskyvyn parantamiseksi. Vasteet ovat kuitenkin hyvin eriävät kahden kuuntelupaikan välillä, joten taajuuskorjauksessa olisi tyydyttävä kompromissiin. Amplitudivastetta voitaisiin parantaa molempien kuuntelupaikkojen osalta vaimentamalla 20 Hz:n huippua noin 10 dB:n verran. Myös 45 Hz:n huippua voisi vaimentaa noin 5 dB:n verran, jolloin kuuntelupaikan A vaste olisi huomattavasti parempi, eikä kuuntelupaikan B osalta tapahtuisi vielä varsinaista heikennystä. Ryhmäviivekuvaajista havaitaan, että noin 20 Hz:n kohdalla äänessä on jopa yli 0,1 sekunnin viive muihin taajuuskomponentteihin nähden molemmissa kuuntelupaikoissa. Myös 45 Hz:n kohdalla on molemmissa paikoissa viivehuippu. Nämä kaksi huippua ovat selkeimmät yhteneväisyydet, ja niiden lieventäminen taajuuskorjaimella parantaisi molempien kuuntelupaikkojen vastetta.

Kuten todettua, amplitudikäyrän arvot matalan selitysasteen alueella kuvastavat tietyllä tavalla mittauksen kohinatasoa. Kahden mittaustaikan kohinatasoja vertailtaessa voidaan todeta, että kohinatasossa on huomattava ero, joten myös signaali-kohina-suhteessa on eroa mittausten välillä. Tätä osattiin odottaa, sillä etäisyys kaiuttimeen vaihtui mittaustaikkojen välillä, mutta toistettavan signaalin amplitudi säilytettiin samana molemmissa mittauksissa. Kohinaa ei kuitenkaan erikseen mitattu, joten sen amplitudista korkeammilla taajuuksilla ei ole tietoa.

Selitysaste on kaiuttimen toistoalueella pääasiassa hyvin korkea. Kuuntelupaikan B kuvaajassa nähdään kuitenkin noin 40 Hz:n kohdalla selvästi matalampia selitysasteen arvoja. Tämä voi johtua matalamman amplitudin aiheuttamasta heikentyneestä signaali-kohina-suhteesta. Ainoastaan selitysastetta tarkastellessa tämä yllättävältä vaikuttava poikkeama ei siis sinällään osoita mittauksen olevan epäluotettava. Sovituksen luotettavuutta tukee kuvassa 9 esitetty aikatazon kuvaus kuuntelupaikan B mittaustuloksesta ja siihen sovitetusta funktiosta kolmella eri taajuudella. Sovitus tehtiin 1,4 sekunnin pituiselle näytteelle, josta kuvan tarkasteluun leikattiin 0,2 sekunnin alue. Selitysaste 10 Hz:n signaalille on 0,003; 20 Hz:n signaalille 0,999 ja 40 Hz:n signaalille 0,907. Vain 10 Hz:n taajuudella sovitusta on selvästi epätarkka.



Kuva 9. Aikatason esitys kuuntelupaikasta B mitatusta signaalista ja sovitetusta funktiosta 10, 20 ja 40 Hz:n taajuuksilla. Amplitudierojen havainnollistamiseksi 20 ja 40 Hz:n kuvaajissa on sama skaala. 10 Hz:n kuvaajassa on käytetty eri skaalaa, jotta sovituksen epätarkkuus käy ilmi.

## 5 POHDINTA

Työlle asetetut tavoitteet saavutettiin, eikä odottamattomia ongelmia havaittu. Mittausten tekniset järjestelyt onnistuivat hyvin eikä ylitsepääsemättömiä hankaluuksia tullut eteen. Mittaustulokset antavat hyödyllistä tietoa käytössä olevasta äänentoistojärjestelmästä.

Mittauksissa käytetyn laitteiston aiheuttama amplitudi- ja ryhmäviivevasteen vääristys kompensoitiin mittaustulosten analysointivaiheessa kaikilta muilta paitsi mikrofonin osalta. Mikrofonin merkitystä mittaustuloksiin onkin syytä arvioida. Valmistaja on ilmoittanut mikrofonin amplitudivasteelle  $\pm 3$  dB:n vaihteluvälin 15–16000 Hz alueella. Mittaustuloksissa nähdään selvästi, että äänentoistojärjestelmän amplitudi laskee voimakkaasti noin 20 Hz taajuuden alapuolella, mikä tarkoittaa, etteivät amplitudin arvot ole toistokyvyn kannalta merkityksellisiä 15 Hz matalammilla taajuuksilla. Mikrofonin vaikutusta amplitudivasteen mittaustuloksiin voidaan siis pitää vähäisenä. Mikrofonin vaikutusta ryhmäviivevasteeseen on sen sijaan vaikea arvioida, sillä valmistaja ei ilmoita siitä tietoa. Tätä asiaa voisi tutkia elektreettikrofonin toimintaperiaatteen teoreettisen tarkastelun kautta, mutta se jätetään tämän työn ulkopuolelle.

Ylimääräisessä ryhmäviiveessä oli vain pieniä vaihteluita kaiuttimen toistoalueella, mikä tarkoittaa, että amplitudivasteen määrittämän minimivaihejärjestelmän ryhmäviivevaste on samanmuotoinen kuin mitattu ryhmäviive. Tästä voidaan päätellä, että mikrofoni on todennäköisesti minimivaihejärjestelmän kaltainen. Jos näin ei olisi, nähtäisiin ylimääräisessä ryhmäviiveessä suurempia vaihteluita.

Amplitudivastetuloksissa huomionarvoista on se, että molemmissa mittauksissa on juuri 15 Hz:n alapuolella paikallinen huippu amplitudissa. On vaikea varmuudella sanoa tämän johtuvan mikrofonista, mutta valmistajan ilmoittamasta taajuusalueesta voidaan päätellä, että 15 Hz alapuolella mikrofonin vasteessa voi olla hyvin merkittävää vaihtelua. On mahdollista, että mikrofoni aiheutti tätä kautta vääristyksiä amplitudivasteen avulla määritettyyn ylimääräiseen ryhmäviiveeseen. Asiaa voitaisiin tutkia lisää kokeilemalla erilaisia amplitudivasteen ekstrapolointimenetelmiä ylimääräisen ryhmäviiveen määrittämiseen. Tässä työssä siihen käytettiin *e*-kantaista eksponenttifunktiota sille osalle amplitudivastetta, jolla selitysaste oli alle 0,5.

Tutkitun järjestelmän suorituskyky on alarajataajuuden osalta kiitettävä, noin 18 Hz, sillä ihmisen kuuloalue rajoittuu noin 20 Hz tuntumaan. Tätä varjostavat kuitenkin suuret  $\pm 10$  dB amplitudivaihtelut toistoalueella. Ilman vertailukohtaa on mahdotonta sanoa, onko tämä kuitenkaan tavattoman huono lukema huoneympäristössä.

Työn tarkoituksena oli tutkia myös taajuuskorjauksen potentiaalisuutta mitattavan järjestelmän äänentoiston parantamiseksi. Tältä osin tuloksissa on pientä epävarmuutta, sillä mittauksen taajuusalueella ei juuri havaittu poikkeamia ylimääräisessä ryhmäviiveessä. Vähäiset muutokset kyseisessä parametrissa merkitsevät teorian mukaan suotuisuutta taajuuskorjaukselle. Tulokset ovat tältä osin siis positiivisia. Jos kuitenkin poikkeamia olisi havaittu, olisi se mahdollisesti vahvistanut käsitystä taajuuskorjauksen suotuisuudesta jollain selkeästi erottuvalla alueella. Saatujen tulosten valossa taajuusalueiden keskinäistä asemaa ei siten voida juuri arvioida. Tulokset ovat silti hyödyllisiä, ja laajentamalla mittauksen taajuusaluetta, voitaisiin saada näkyville suurempia vaihteluita ja sitä kautta laajempi käsitys taajuuskorjauksen mahdollisuuksista.

## 6 YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin tyypillisen kodin äänentoistojärjestelmän suorituskykyä matalia taajuuksia toistavan alabassokaiuttimen ja kuunteluhuoneen osalta. Suorituskyvyn todettiin äänentoiston tapauksessa olevan pohjimmiltaan subjektiivinen termi, mutta järjestelmän käyttötarkoitusten perusteella päädyttiin arvioimaan sitä kahden keskeisen parametrin pohjalta, jotka olivat amplitudi- ja ryhmäviivevaste. Lisäksi näiden ominaisuuksien parantamismahdollisuuksia arvioitiin. Taajuuskorjauksen teoreettisen tarkastelun pohjalta päädyttiin määrittämään tutkittavalle järjestelmälle niin kutsuttu ylimääräinen ryhmäviive, jonka avulla arvioitiin taajuuskorjaukselle suotuisia taajuusalueita.

Mittausjärjestelyt ja käytetyt menetelmät esiteltiin kattavasti ja niiden vaikutusta arvioitiin. Mittausmenetelmä pohjautui porrastettuun sinipyyhkäisyyn, ja sen antamat tulokset olivat pääosin luotettavia. Mittalaitteiston aiheuttamia vääristyksiä pystyttiin kompensoimaan, mutta mikrofoniin vaikutus ryhmäviivevasteen osalta jäi epäselväksi.

Amplitudivasteen mittaukset osoittivat järjestelmän alarajataajuuden olevan noin 18 Hz tai alempi, joka on samaa luokkaa kuin ihmisen kuuloalueen alaraja. Kuitenkin vaihtelu tämän yläpuolella oli suurta, joten amplitudivasteen osalta suorituskyky oli ristiriitainen. Ryhmäviivevasteen osalta tulokset osoittivat puutteellista suorituskykyä matalimmilla toistotaajuuksilla, joskin mittaustuloksien luotettavuus jäi kyseenalaiseksi. Ylimääräisen ryhmäviiveen tulokset viittasivat siihen, että taajuuskorjaus käänteisen siirtofunktion suodattimella olisi mahdollista. Mittaukseen valittujen kahden kuuntelupaikan vasteissa oli kuitenkin suuria eroja, eikä kattavaa taajuuskorjausta voitaisi toteuttaa yhtäaikaaisesti molemmille kuuntelupaikoille. Kaiken kaikkiaan tulokset antoivat hyödyllistä tietoa käytössä olevasta äänentoistojärjestelmästä.

## 7 LÄHDELUETTELO

- [1] Blomberg E. & Lepoluoto A. (2005) Audiokirja – Audiotekniikkaa ammattilaisille ja kehittyneille harrastajille. Verkkopainos, URL: <http://ari.lepoluo.to/audiokirja>
- [2] Dietrich P. (2013) Uncertainties in Acoustical Transfer Functions: Modeling, Measurement and Derivation of Parameters for Airborne and Structure-borne Sound. Logos Verlag Berlin GmbH, Berlin, 215 s.
- [3] Müller S. & Massarani P. (2001) Transfer-Function Measurement with Sweeps. Journal of the Audio Engineering Society 49, s. 443–471.
- [4] Vorländer M. & Kob M. (1997) Practical Aspects of MLS Measurements in Building Acoustics. Applied Acoustics, Vol. 52, No. 314, s. 239–258.
- [5] Peltonen T. (2000) A Multichannel Measurement System for Room Acoustics Analysis. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Helsinki.
- [6] Jayakody D. (luettu 15.1.2020) Restored Victor SEA-50 graphic equalizer. URL: <https://www.flickr.com/photos/jayakody2000lk/23789626633>
- [7] Bohn D. (1986) Constant-Q Graphic Equalizers. Journal of the Audio Engineering Society, Vol. 34, No. 9, s. 611–626.
- [8] Radlović B. (2000) Nonminimum-Phase Equalization and Its Subjective Importance in Room Acoustics. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 8, No. 6, s. 728–737.
- [9] Smith J. (luettu 15.1.2020) Definition of Minimum Phase Filters. URL: [https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Definition\\_Minimum\\_Phase\\_Filters.html](https://ccrma.stanford.edu/~jos/filters/Definition_Minimum_Phase_Filters.html)
- [10] Mulcahy J. (luettu 15.1.2020) Minimum Phase. URL: [https://www.roomeqwizard.com/help/help\\_en-GB/html/minimumphase.html](https://www.roomeqwizard.com/help/help_en-GB/html/minimumphase.html)
- [11] Neely S. & Allen J. (1979) Invertibility of a room impulse response. Journal of the Acoustical Society of America, 66(1), s. 165–169.
- [12] McDaniel J. & Clarke C. (2001) Interpretation and identification of minimum phase reflection coefficients. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 110, No. 6, s. 3003–3010.
- [13] Oppenheim A. V., Schafer R. W. & Buck J. R. (1999) Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall, New Jersey, 870 s.
- [14] Mellin I. (luettu 15.1.2020) Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. URL: <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Regranal.pdf>
- [15] PUI Audio (luettu 15.1.2020) POM-2738L-LW100-R Microphone Specifications. URL: <http://www.puiaudio.com/pdf/POM-2738L-LW100-R.pdf>
- [16] PUI Audio (luettu 15.1.2020) POM-2738L-LW100-R. URL: <http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2738L-LW100-R>
- [17] Linkwitz S. (luettu 15.1.2020) System Test. URL: [http://linkwitzlab.com/sys\\_test.htm#Mic](http://linkwitzlab.com/sys_test.htm#Mic)
- [18] Audacity (luettu 15.1.2020). URL: <https://www.audacityteam.org>